

포항 이산화탄소 지중저장 시험 사이트 특성

김선경¹ · 장찬동^{1*} · 신영재² · 권이균³

¹충남대학교 지질환경과학과, ²한국지질자원연구원 CO₂지중저장연구단, ³공주대학교 지질환경과학과

Characteristics of Pohang CO₂ Geological Sequestration Test Site

Seon-Kyoung Kim¹ · Chandong Chang^{1*} · Youngjae Shinn² · Yikyun Kwon³

¹Department of Geology, Chungnam National University

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

Abstract

We analyze geological, petrophysical and geomechanical characteristics of a CO₂ sequestration test site, Pohang. The target reservoir exists at a depth of 750 m, where porous and permeable sandstones/conglomerates prevail. The reservoir is underlain by thick mudstone formations. We estimate in situ stress conditions using an exploratory wellbore drilled through the target reservoir. The in situ stress condition is characterized by a strike-slip faulting favored stress regime. We discuss various aspects of reservoir fracture pressures and fault reactivation pressures based on the stress magnitudes.

Keywords: CO₂ sequestration, geomechanics, in situ stress, fracture pressure, fault reactivation pressure

초 록

본 논문에서는 이산화탄소 지중저장 시험이 진행 중인 포항 영일만 지역의 지질학적, 암석물리학적, 지질역학적 특성에 대한 분석 결과를 보고한다. 대상 저류층은 영일만 해상 퇴적층 750 m 심도에 다공질, 투수성의 사암/역암층으로 존재하며 상부에 두꺼운 이암층으로 덮고 있다. 해상에 굴착된 탐사시추공에서 측정된 응력 값은 이 지역이 주향이동 단층운동에 유리한 응력체계를 보인다. 측정된 응력 값에 기반하여 다양한 유형의 저류층 파쇄압력, 주변 단층의 전단활성 압력 등에 대한 정보에 대해 고찰하며 분석하였다.

주요어: 이산화탄소 지중저장, 지질역학, 초기응력, 파쇄압력, 단층 전단활성 압력

서론

지구온난화 가스를 감축하고자 하는 방법 중 이산화탄소를 지중저장하여 처분하는 기법은 국제적으로 받아들여지고 있는 방법이다(Metz et al., 2005; Bachu et al., 2007). 이러한 기법을 적용함에 있어 적절한 사이트의 선정과 저장소의 지질학적, 암석물리학적, 지질역학적 특성 분석은 사업의 성공을 담보하기 위한 중요한 선결 조건이다. 충분한 양의 이산화탄소를 저장할 수 있는 저장 공간(공극)이 확보와 지중저장 후 장기간 동안 누출을 방지하기 위한 저장소 기밀성 확보는 이러한 제반 특성들에 좌우되기 때문이다.

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Chandong Chang
E-mail: cchang@cnu.ac.kr

Received: 14 May, 2018

Revised: 4 June, 2018

Accepted: 8 June, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

먼저 효과적인 이산화탄소 지중저장을 위해서는 주입에 용이한 충분한 공극률과 투과도를 갖는 저류층(reservoir)과 저장된 이산화탄소의 누출을 방지할 수 있는 충분한 불투수성 덮개암(cap-rock)이 존재해야 하며 이산화탄소를 유동시킬 수 있는 투수성 단층이 부재하는 것이 선호된다. 포항 영일만 지역의 포항분지는 이러한 관점에서 적절한 사이트로 분석되어 왔다(Han and Keehm, 2013; Kim et al., 2014; Lee and Kwon, 2014; Choi et al., 2015; Park et al., 2015; Song et al., 2015).

본 논문에서는 포항 영일만 지역에서 수행된 일련의 현장 시험에 대한 분석을 통해 이 지역의 초기응력 특성, 저류층의 암석물리학적 특성, 그리고 분포하는 단층의 지질역학적 특성에 대해 보고한다.

연구지역의 지질 특성

연구지역은 포항시 영일만 해상의 포항분지 지역이다(Fig. 1). 영일만 지역의 지질구조와 대상 저장층에 대한 정보를 확보하고 이를 통해 이산화탄소 주입시추공의 적정 위치를 선정하기 위하여 3D탄성파 탐사가 진행되었으며 다수의 북동-남서 주향, 가파른 경사의 단층들이 존재하고 있음을 확인하였다(Fig. 2). 좀 더 정확한 정보를 위해 탄성파 탐사 라인 남단에 980 m 심도의 탐사시추를 진행하였으며 전 심도에 걸쳐 코어를 획득하였다. 탐사시추공 위치에서 해수 심도는 약 13 m이다.

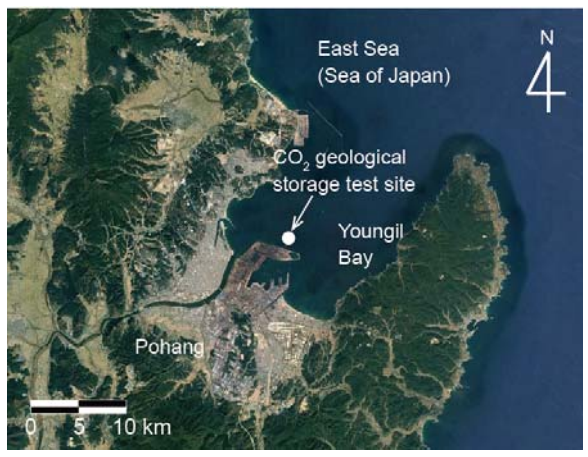


Fig. 1. Location of CO₂ geological storage test site.

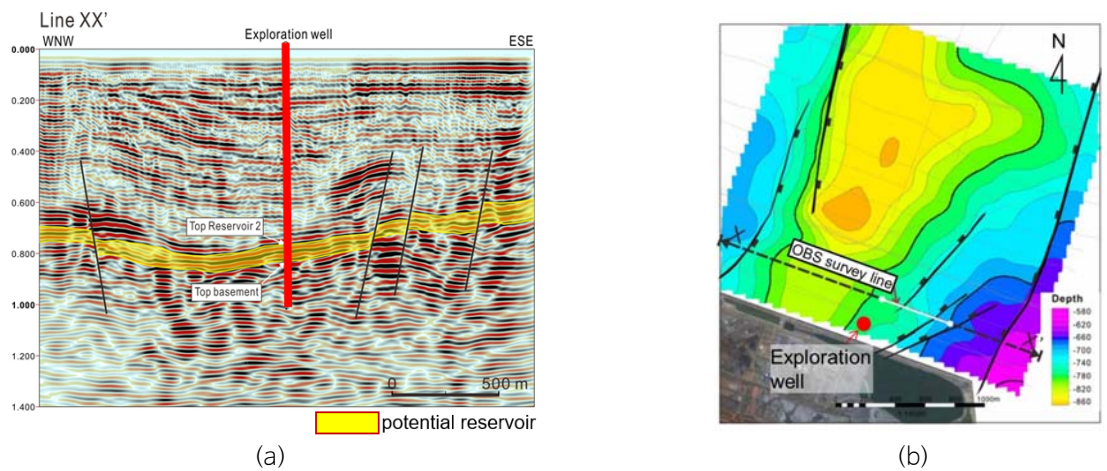


Fig. 2. 3D seismic survey results: (a) profile and (b) plane view of the basin, showing that faults cross the target storage reservoir formation. Contours in (b) represent top depths of the reservoir.

탄성과 탐사와 시추코어 검층을 통해 750 m구간에 사암/역암층이 존재함을 확인하였으며 이 심도의 시추코어를 통해 측정된 공극률은 약 20%, 투과도는 약 30 md로 측정되어 이산화탄소 지중저장을 위해 효과적인 저류층임을 확인하였다. 이 저류층 상부에는 해저면부터 약 740 m까지 두꺼운 이암층이 덮고 있어 덮개암 역할을 할 것으로 보인다.

연구지역의 지질역학 특성

확장 leak-off 시험

확장 leak-off 시험(extended leak-off test, XLOT)은 케이싱 설치 후에 시추공의 기밀성 확인과 케이싱 하부 추가 시추를 위한 파쇄압력 측정을 위해 석유개발 시추 과정에서 흔히 수행되는 시험이다(Addis et al., 1998; Gjønnnes et al., 1998; White et al., 2002). 저장소 파쇄압력과 초기응력장에 대한 정보를 얻기 위한 목적으로 탐사시추공을 이용하여 XLOT를 수행하였다. 시험은 탐사시추공의 약 700 m 심도에서 수행되었다. XLOT를 수행하기 위한 전 처리 과정은 석유업계에서 흔히 사용하는 방식을 최대한 따라 진행 되었다. 700 m 심도까지 시추 후 케이싱을 설치하였으며 해수에서 양생 가능한 특수 시멘트재로 그라우팅 처리하였다. 약 4일 간의 그라우팅 양생 후에 케이싱 슈 하부로 4 m 심도의 추가 시추공을 굴진하였으며 이 4 m 나공 구간이 XLOT 시험 구간이다. XLOT를 수행하기 위해서는 케이싱 상부를 밀봉할 수 있는 고비용의 blow-out preventer (BOP)가 필요하나 과도한 비용지출을 피하기 위해 특수 end-cap을 제작하여 케이싱 상부를 밀봉하였다.

밀봉된 시추공 내로 3회의 물 주입을 통해 시험이 진행되었으며 시험 과정에서 수압과 물 주입량을 연속적으로 측정하였다. 첫 물 주입 사이클에서 시험 구간 압력은 약 17 MPa (breakdown pressure)까지 증가한 후 지층이 파열되며 급격히 압력이 감소하는 결과를 보였다. 지층파쇄는 공내 수압 증가에 따른 인장 균열의 발생에 기인한다. 두 번째와 세 번째의 주입 사이클에서는 약 13 MPa의 최고압력을 보였으며 그 후 점진적인 압력 감소를 보인다. 첫 번째와 두세 번째 주입 사이클의 근본적 차이는 인장균열의 존재 유무이다. 균열의 존재 유무는 공내 압력 조건에 큰 차이를 초래한다. 실제 저장소의 파쇄 압력 또한 어떠한 형태이든 자연적 균열이나 소규모 단층들의 존재 유무에 의해 결정되게 된다. 이에 따라 저류층의 파쇄 압력은 보수적으로 규명하는 것이 현명하다.

XLOT를 통한 미세규모(micro-scale) 파쇄시험으로부터 다양한 유형의 파쇄압력 값을 도출할 수 있다. 가장 낙관적인 파쇄압력은 LOT 최초 사이클에서의 파쇄압력 17.0 MPa이며 압력구배를 통해 저장층 심도(750 m)로 외삽하여 구한 파쇄압력은 18.2 MPa이다. 이 압력은 주입공 주변으로 자연균열이 전혀 없는 완벽한 주입공 상태가 가정할 때의 값이다. 그러나 퇴적층 특성상 주입공 주변으로 어떠한 형태로든 자연 균열이 존재할 경우 파쇄압력은 낮아지게 된다. 가장 인장파쇄되기 쉬운 방향으로 균열이 존재하면 이 균열에 의해 파쇄압력은 LOT의 두 번째나 세 번째 사이클의 압력 값이 되며 이는 700 m 심도에서 13.0 MPa, 저장층 심도에서 13.9 MPa이다. 즉, 저장층 심도, 주입공 주변의 자연균열 유무에 따라 13.9~18.2 MPa의 파쇄압력 범위를 갖는다.

응력특성

이산화탄소 지중저장 사이트의 응력 특성은 저장소 암반의 안정성 평가를 위해 필요한 요소로 본 연구에서는 시추공 영상검층 자료에서 관찰된 시추공 응력 지시자와 함께 앞에 기술한 leak-off 시험 결과를 근거로 저장소 응력 특성을 분석하였다. 초기응력(in situ stress)이 작용하고 있는 지층에 시추공이 굴진되면 이로 인해 시추공 주변에서 응력 교란 현상이 발생하며 많은 경우 시추공벽 암석에 파괴를 유도하게 된다. 시추공벽 암석 파괴(borehole breakout)는 지층에 작용하는 최대수평주응력 방향에서 직교하는 방위각 방향으로 발생하게 되며 이를 영상 검층으로 관찰하면 응력 방향에 대한 지시자

로 활용할 수 있다.

영일만 탐사시추공에서 시추공 초음파 영상 검층기를 이용해 약 703 m 심도까지 영상검층을 수행하였으며 약 200~500 m 심도 구간에 걸쳐 거의 연속적으로 공벽파괴 현상을 관찰하였다(Fig. 3). 공벽파괴대의 방위각은 심도에 따라 심도 300 m의 상부에서는 대체로 NNE-SSW 방향으로 발생하여 점차 N-S 방향으로 반시계방향의 회전양상을 보인다. 이는 최대수평주응력의 방향 또한 천부에서 심부로 갈수록 ESE-WNW에서 E-W 방향으로 회전되고 있음을 지시한다. 심부에서의 E-W 응력 방향은 한반도에서 우세하게 나타나는 현생지각 응력 방향과 유사하다.

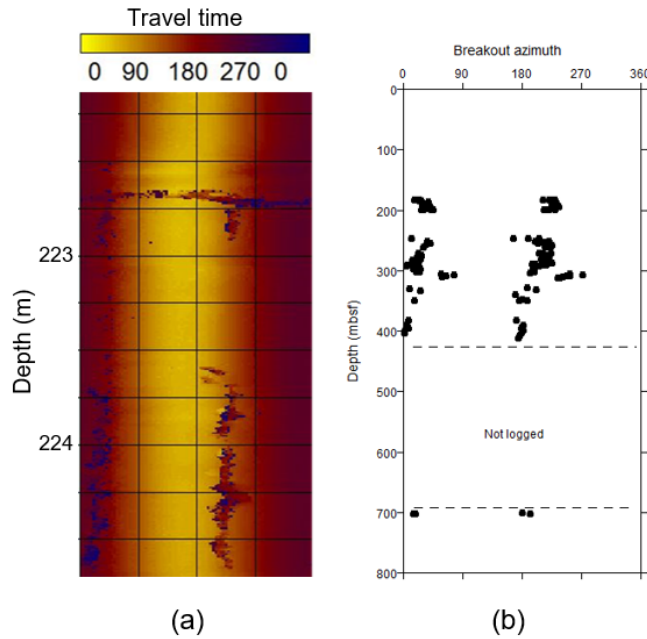


Fig. 3. Borehole breakouts observed in Pohang exploratory well: (a) example of borehole image, (b) azimuth of borehole breakouts.

응력장의 크기는 최대수평주응력, 최소수평주응력, 그리고 연직응력의 세 주응력의 크기로 기술된다. 저장소에 작용하는 연직응력(S_v)은 시추코어를 활용해 덮개암의 밀도를 측정하고 이를 이용한 상재하중으로 계산하였다. 연직응력은 심도에 따라 준선형적으로 증가하고 700 m 심도에서는 13.8 MPa로 계산되었다. 이는 이 지역의 연직응력 구배가 평균적으로 19.7 MPa/km임을 지시한다.

최소수평주응력(S_{hmin})의 크기는 XLOT의 결과에서 shut-in pressure 규명을 통해 유추하였다. 즉, 700 m 심도에서 평균 12.0 MPa의 S_{hmin} 값을 보였으며 이는 이 지역의 균열파쇄압력 또는 최소주응력 구배가 평균 17.1 MPa/km임을 지시한다. 마지막 응력 성분인 최대수평주응력(S_{Hmax})은 시추공벽 압축파쇄대의 폭(width)과 암석강도를 비교하는 방법으로 규명하였다. 700 m에 발달한 시추공벽 압축파쇄대의 폭은 26°이며 해당 심도의 암석코어에 대해 일련의 세 방향의 압축응력에 대한 시험으로 얻어진 암석의 고유성질인 일축압축강도(uniaxial compressive strength: UCS)는 30±1 MPa이다. 주어진 S_{hmin} , S_v , 그리고 암석의 일축압축강도의 조건에서, 관찰된 시추공벽 압축파쇄대의 폭(26°)을 형성시키기 위한 S_{Hmax} 의 크기는 약 19±0.4 MPa로 규명되었다. 이는 이 지역의 평균 최대주응력 구배가 27.1 MPa/km임을 지시한다.

규명된 세 주응력의 크기를 통해 볼 때 영일만 저장소의 응력상태는 $S_{hmin} < S_v < S_{Hmax}$ 의 주향이동 단층운동에 유리한 응력체계 하에 있음을 지시한다.

저장소 덮개암 기밀성

덮개암의 투과도(permeability)는 이산화탄소 저장소의 기밀성을 대표할 수 있는 하나의 척도이며 저장소의 잠재적인 누출 가능성을 평가하기 위한 가장 중요한 암석 물성이다. 덮개암 투과도 규명을 위하여 본 연구에서는 두 규모(scale)에서의 덮개암 투과도 규명을 시도하였다. 한 조건은 시추공 규모이고 다른 조건은 실내실험을 통한 시추코어 규모에서의 투과도이다.

시추공 규모 투과도 측정 시도는 앞에 기술한 XLOT을 통해 수행되었으며 상세한 분석법은 Quach et al. (2018)의 논문에서 제시되어 있다. XLOT는 700 mbsf 심도에서 수행되었으며 해당 심도에서의 투과도 정보를 제공한다. 덮개암 투과도는 leak-off test의 주입, 압력 결과로부터 유추하였다. 이를 위해 leak-off test 조건에 적절한 방사형 유체흐름에 대한 확산방정식을 이용하였으며 투과도에 따라 시추공 내 압력 상승이 어떻게 발생하는지에 따라 투과도를 결정하는 방식이다. 확산방정식으로부터 이론적으로 계산된 결과와 실제 시추공 XLOT 시험 결과와의 비교로부터 규명된 덮개암 투과도는 약 $(3-7) \times 10^{-16} \text{m}^2$ 로 규명되었다(Quach et al., 2018). 이 값은 알려진 이암의 투과도 범위(10^{-23} - 10^{-16}m^2) 보다 비교적 높은 값이나 범위의 상한 값에 해당된다.

저장소 덮개암 파쇄한계

덮개암 파쇄는 크게 두 가지 파쇄 유형으로 검토되어야 한다. 첫 번째는 주입에 동반된 압력 증가에 따른 덮개암 지층수압파쇄(인장파괴), 두 번째는 압력증가에 따른 기존 균열이나 단층의 전단파괴이다. 수압파쇄는 벌어진 균열면을 통해 이산화탄소 누출을 초래할 수 있으며 기존의 균열이나 단층의 전단파괴는 단층의 밀봉 기밀성 파괴를 야기시켜 이산화탄소 누출을 초래할 수 있어 두 유형의 파쇄 모두 주입된 이산화탄소의 누출을 초래할 수 있다. 지층수압파쇄는 XLOT를 통해 규명한 파쇄압력, 즉 평균 17.1 MPa/km의 압력조건이 되면 발생한다. 반면 기존 균열이나 단층의 전단파괴 압력 조건은 단층의 방향에 따라 변화한다. 이 때 가장 보수적인 접근 방법은 단층의 방향이 주어진 응력 조건에서 가장 전단파괴하기 용이한 방향성을 보인다는 가정 하에 임계 압력을 산정하는 방법이다. 주어진 응력 조건 하에서 가장 전단파괴되기 용이한 방향의 단층의 전단파괴 조건은 단층마찰법칙에 의해 기술될 수 있어

$$S_{Hmax} - P_p = (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2 (S_{hmin} - P_p) \quad (1)$$

의 식을 만족하면 발생한다(Zoback, 2010). 여기서 μ 는 단층이나 균열의 마찰계수로서 보통 심부에서는 보수적으로 0.6의 값으로 가정하였다(Rutqvist et al., 2007). 영일만 지역의 응력장은 S_{Hmax} 의 경우 27.1 MPa/km의 구배를 가지며 S_{hmin} 의 경우 17.1 MPa/km의 구배를 보여 식 (1)을 이용하면 단층의 전단파괴를 유발시키는 임계압력 구배는 12.4 MPa/km로 계산된다. 즉, 자연 상태에서의 공극압을 정수압(9.8 MPa/km)이라 할 때 약 2.6 MPa/km의 추가 공극압력 증가가 허용된다는 결과이다. 따라서 덮개암 파쇄는 인장균열 발생에 의한 수압파쇄압력(17.1 MPa/km)이 도달되기 전 기존 단층의 전단파괴를 야기시키는 압력(12.4 MPa/km)에 의해 먼저 발생된다. 이러한 공극압은 단층의 전단운동을 유발시킬 만큼 덮개암의 상당 부분으로 확산되어야 가능하다. 즉, 이산화탄소 주입시 주입공으로부터 상당한 거리에 까지 공극압이 상기한 압력 조건으로 증가되어야 덮개암 파쇄가 발생한다.

영일만 지역 단층 전단활성 조건

영일만 심부 응력장, 균열/단층의 전단강도 등을 고려하여 영일만 저류층 내에 분포하는 단층들의 전단운동 조건을 산정할 수 있다. Fig. 2의 탄성파탐사 결과로부터 얻어진 영일만 저류층 주변에 분포하는 단층의 자세를 고려하여 현생 응력 조건 하에서 단층들의 전단성향(slip tendency)을 분석하였다. 주어진 지중 주응력장(S_{hmin} , S_v , S_{Hmax})으로부터 각 단층면에 작용하는 전단응력(τ)과 유효수직응력(전수직응력(S_n)-공극압)을 계산하면 각 단층의 전단성향(T)은

$$T = \tau / (S_n - P_p) \tag{2}$$

로 정의 된다(Morris et al., 1996). 단층의 전단성향이 높을수록 상대적으로 불안정한 단층이다. 즉, 주어진 응력장 하에서 단층의 전단성향은 단층의 방향에 따라 변하게 되는데 영일만의 응력 조건에서 단층의 극점(pole) 방향에 따른 전단성향을 스테레오넷 상에 다른 색으로 도시하면 Fig. 4와 같다. 가장 불안정한 방향의 단층은 그 극점이 남북 수평방향을 향하거나 N60E 수평방향을 갖는 단층들이다. 이들 단층의 방향은 동서의 주향을 갖거나 N60W의 주향을 갖는 연직단층들에 해당된다.

그러나 영일만 저장소 주변에 존재하는 단층들은 대체로 NNE-SSW 방향의 주향을 보여 영일만 응력장 조건에서는 비교적 낮은 전단성향을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 4). 즉, 현재의 응력조건에서는 이들 단층들은 비교적 안정한 상태를 알 수 있다. 실제 이들 단층들의 전단활성화를 야기할 수 있는 공극압 또한 유추할 수 있는데 이를 위해서는 단층의 마찰 계수에 대한 정보를 알아야 한다. 단층의 마찰계수는 보수적으로 0.6으로 가정하였다(Rutqvist et al., 2007). 단층의 전단활성화는 전단성향이 단층의 마찰계수와 같아질 때 발생하므로 식 (2)로부터

$$P_p = S_n - (\tau / \mu) \tag{3}$$

의 조건을 만족하는 공극압이 단층 전단활성을 유발하는 임계 공극압이 된다. Fig. 4에 도시된 각 단층의 경사각을 50~70° 범위로 가정하여 임계공극압을 계산하면 4.5~7.1 MPa/km의 범위로 나타난다. 이 값은 위에 산정한 가장 불안정한 방향

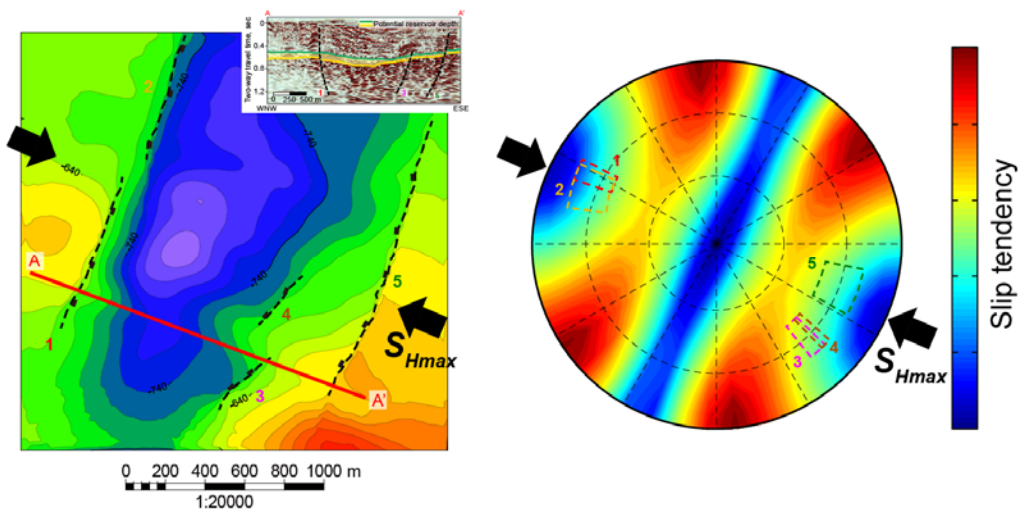


Fig. 4. Slip tendency analysis for large-scale faults distributed in Youngil Bay.

을 갖는 가상의 단층에 대한 임계 공극압 구배(약 2.6 MPa/km)보다 당연히 큰 공극압 증가를 허용함을 의미한다. 이 값을 저류층 심도(750 m)로 심도 보정하여 압력 값을 계산하면 3.5~5.9 MPa의 추가 공극압 증가량이 된다.

결론

포항 영일만 해상에서 진행 중인 이산화탄소 지중저장 시험 현장에 대해 지질학적, 지질역학적 특성에 초점을 맞추어 분석된 결과를 통해 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1. 대상 저류층은 750 m 심도에 분포하는 다공질, 투수성의 사암/역암층이며 투과도가 낮은 두꺼운 이암층으로 덮여있음.
2. 저장층 심도, 주입공 주변의 자연균열 유무에 따라 13.9~18.2 MPa의 인장균열 파쇄압력 범위를 보임.
3. 탄성파 탐사 결과에서 감지된 큰 규모의 단층들을 재활성화하기 위해서는 단층 인근으로 공극압이 증가해야 하며 저류층 심도에서 정수압보다 추가로 3.5~5.9 MPa의 공극압 증가가 단층 인근에서 발생해야 이들 단층이 재활성 된다.

사사

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20162010201980).

References

- Addis, M. A., Hanssen, T. H., Yassir, N., Willoughby, D. R., Enever, J., 1998, A comparison of leak-off test and extended leak-off test data for stress estimation, Eurock 98 Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Trondheim, Norway, 131-140.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen N.P., Mathiassen O.M., 2007, CO₂ storage capacity estimation: methodology and gaps, International Journal of Greenhouse Gas Control, 1, 430-443.
- Choi, B.Y., Park, Y.C., Shinn, Y.J., Kim, K.Y., Chae, G.T., Kim, J.C., 2015, Preliminary results of numerical simulation in a small-scale CO₂ injection pilot site: 1. Prediction of CO₂ plume migration, Journal of the Geological Society of Korea, 51(5), 487-496.
- Gjønnnes, M., Cruz, A.M., Horsrud, P., Holt, R.M., 1998, Leak-off tests for horizontal stress determination?, Journal of Petroleum Science and Engineering, 20(1), 63-71.
- Han, J.H., Keehm, Y., 2013, Reservoir property estimation in Pohang basin, south Korea for the preliminary CO₂ storage prospect, American Geophysical Union Fall Meeting, H23B-1256, 382-382.
- Kim, A.-R., Cho, G.-C., Kwon, T.-H., 2014, Site characterization and geotechnical aspects on geological storage of CO₂ in Korea, Geosciences Journal, 18, 167-179.
- Lee, O.Y., Kwon, Y.K., 2014, Evaluation of a promising CO₂ storage reservoir and storage capacity in Yeongil bay, Pohang basin offshore, East Sea, In Proceedings of Joint Conference on Geology and Geoscience Technique in Korea, Goseong, 337-337.
- Metz, B., Davidson, O., Coninck, H. C., Loos, M., Meyer, L.A., 2005, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, New York., 443pp.
- Morris, A., Ferrill, D.A., Henderson, D.B., Slip-tendency analysis and fault reactivation, Geology, 24(3), 275-278.
- Park, J.Y., Kim, J.M., and Yoon, S.H., 2015, Three-dimensional geologic modeling of the Pohang Basin in Korea for

geologic storage of carbon dioxide, *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(3), 289-302.

Quach, N.Q., Jo, Y., Chang, C., 2018, Rock permeability estimation from hydraulic injection tests in a sealed borehole interval, *The journal of Engineering Geology of Korea*, 28(1), 1-9.

Rutqvist, J., Birkholzer, J., Cappa, F., Tsang, C.-F., 2007, Estimating maximum sustainable injection pressure during geological sequestration of CO₂ using coupled fluid flow and geomechanical fault-slip analysis, *Energy Conversion and Management*, 48(6), 1798-2807.

Song, C.W., Son, M., Sohn, Y.K., Han, R., Shinn, Y.J. Kim, J.C., 2015, A study on potential geologic facility sites for carbon dioxide storage in the miocene Pohang Basin, SE Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(5), 53-66.

White, A.J., Traugott, M.O., Swarbrick, R.E., 2002, The use of leak-off tests as means of predicting minimum in situ stress, *Petroleum Geoscience*, 8, 189-193.

Zoback, M.D., 2010, *Reservoir Geomechanics*, Cambridge University Press.